

Riflettanza di superfici vulcaniche: la campagna 2003 sul Monte Etna

Ruggero Casacchia¹, Francesco Mazzarini², Claudia Spinetti³, Laura Colini³,
Marco Neri⁴, Boris Behncke⁴, Maria Fabrizia Buongiorno³, Valentina DeSantis¹,
Alessandra Grignetti¹ e Rosamaria Salvatori¹

¹CNR - Istituto sull'Inquinamento Atmosferico, 00016 Monterotondo Stazione, Roma.

E-mail: ruggero.casacchia@cnr.it

²Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - sezione Roma 1, via della Faggiola 32 - 56100 Pisa

³Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - sezione di Roma CNT, via di Vigna Murata 605, 00143 Roma

⁴Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - sezione di Catania, Piazza Roma 2 - 95125 Catania

Riassunto

Vengono presentati e discussi i risultati ottenuti a seguito di una campagna spettroradiometrica effettuata nel giugno 2003 sul Monte Etna. Scopo della campagna era quello di realizzare una prima indagine sulle caratteristiche di riflettanza dei depositi piroclastici recenti prodotti dall'attività eruttiva 2002-2003 e sulle colate più antiche. A tal fine sono state predisposte delle schede per l'acquisizione dei dati e sono stati selezionati siti rappresentativi delle unità vulcaniche etnee. Dai risultati ottenuti si evince che i depositi piroclastici recenti, indipendentemente dalla granulometria e dal tipo di materiale che li costituisce, presentano valori di riflettanza costanti. Le colate di tipo pahoehoe hanno valori di riflettanza maggiori, sebbene la caratterizzazione spettrale delle colate più antiche non possa prescindere dalla presenza di prodotti di alterazione e delle coperture vegetali che ne influenzano l'entità.

Abstract

The results obtained in Mt. Etna spectroradiometric field survey of June 2003 are presented and discussed. The goal of the survey was the analysis of the reflectance properties of the young pyroclastic deposits produced after the effusive activity of 2002-2003 and of the older lava flows. To achieve this goal, a template was created in order to organize the field data collected in a number of selected sites characterised by different surface materials. The results show that reflectance of pyroclastic flows is always very low and constant, besides grain size and composition of the flow. Pahoehoe units show higher reflectance values, even though the spectral characterisation of the older lava flows must take into account weathering products and vegetation coverage.

Introduzione

La spettroradiometria è la disciplina scientifica che permette di analizzare quantitativamente la relazione tra la radiazione solare incidente e le caratteristiche dei materiali, mediante la misura della proprietà di riflessione del materiale (Riflettanza). I valori di Riflettanza sono funzione della lunghezza d'onda (λ) ed il loro andamento, in un determinato intervallo di lunghezze d'onda, definisce la firma spettrale di uno specifico materiale. La variabilità dei valori di riflettanza in funzione di λ è alla base dell'utilizzo del Telerilevamento ottico

passivo in moltissime applicazioni ambientali, tra cui il monitoraggio e la mappatura di aree vulcaniche attive [Mazzarini et al., 2001; Bogliolo et al., 2004] e lo studio dei componenti dei pennacchi vulcanici (*plumes*) emessi dai crateri sommitali, quale l'aerosol [Spinetti et al., 2003]. Tuttavia, poiché i valori misurati da remoto risentono degli effetti atmosferici e di specifiche condizioni ambientali (*i.e.* esposizione dei versanti), le immagini satellitari devono spesso essere calibrate ed interpretate con il supporto di misure spettroradiometriche in campo [Goetz, 1992; Barry et al., 2002]. I valori delle firme spettrali (o dati di verità a terra) dipendono da numerosi fattori che, nel caso di superfici rocciose, comprendono: composizione mineralogica e stato di alterazione, morfologia del campione, granulometria ed umidità (nel caso di materiali non consolidati). In particolare, nel caso delle rocce vulcaniche di tipo basaltico, che sono l'oggetto di questo studio, le firme spettrali negli intervalli spettrali del visibile e del vicino infrarosso non mostrano strutture quali picchi di riflessione o di assorbimento caratteristici, tranne che per il picco di assorbimento del ferro a 1.0 μm [Carmichael, 1982]. Queste rocce mafiche presentano in genere una riflettanza molto bassa a causa della composizione mineralogica; eventuali variazioni dei valori di riflettanza possono essere determinate da un diverso stato di alterazione e, nel caso di depositi piroclastici, da una diversa granulometria [Clark e Roush, 1984; Hapke, 1993].

All'interno dei *software* commerciali dedicati all'elaborazione delle immagini telerilevate sono presenti librerie di firme spettrali che comprendono prevalentemente dati di laboratorio relativi a rocce e minerali delle tipologie più diffuse. Questi dati però non possono tenere conto delle specificità ambientali e ciò determina l'esigenza di costruire archivi di misure di riflettanza e dati ausiliari "dedicati".

In questo lavoro sono presentati e discussi i risultati di una campagna spettroradiometrica condotta sull'Etna nel giugno 2003, al fine di determinare le firme spettrali delle diverse coperture vulcaniche. Molte delle superfici presenti sull'Etna sono modificate frequentemente dall'intensa attività del vulcano che produce colate di lava e depositi piroclastici o *tephra* [Behncke e Neri, 2003; Branca e Del Carlo, 2004] che si sovrappongono alle colate più antiche, spesso coperte da vegetazione. La campagna di misure spettroradiometriche, acquisite nell'intervallo di lunghezza d'onda 350-2500 nm, ha avuto pertanto i seguenti obiettivi:

- a) caratterizzare spettralmente colate antiche e recenti ed i depositi di ceneri e scorie;
- b) correlare le variazioni di riflettanza alle caratteristiche delle superfici misurate (*i.e.* dimensioni dei grani per i depositi cineritici);
- c) verificare le capacità di monitoraggio di sensori satellitari ottici.

Si evidenzia inoltre che i dati presentati in questo lavoro sono le prime firme spettrali delle unità vulcaniche etnee, acquisite con sistematicità su colate di età diversa. Pertanto il presente lavoro ha un carattere decisamente sperimentale poiché ha consentito, in questa prima fase, di individuare i criteri per l'acquisizione delle firme spettrali e le caratteristiche principali di alcune delle colate più rappresentative dell'area di studio.

Area di studio

L'Etna, situato nella Sicilia orientale, è il più grande ed il più attivo dei vulcani europei e raggiunge un'altezza di circa 3300 m s.l.m.. I crateri attivi sommitali sono un sistema di condotti centrali collocati immediatamente ad Ovest della Valle del Bove, una struttura di collasso profonda 1000 m, lunga 7 km ed ampia 5 km (Fig. 1). Le eruzioni avvengono sia dai crateri sommitali (Cratere di nordest, Voragine, Bocca Nuova, Cratere di sudest) che lungo i fianchi del vulcano. Dalla fine degli anni '70 le eruzioni sommitali sono aumentate in intensità, con episodi eruttivi parossistici estremamente violenti culminati dal 1995 al 2005 in 120 eventi, molti dei quali hanno interessato il cratere di sudest [Behncke e Neri, 2003; Branca e Del Carlo, 2004]. Questi episodi hanno generato fontane di lava accompa-

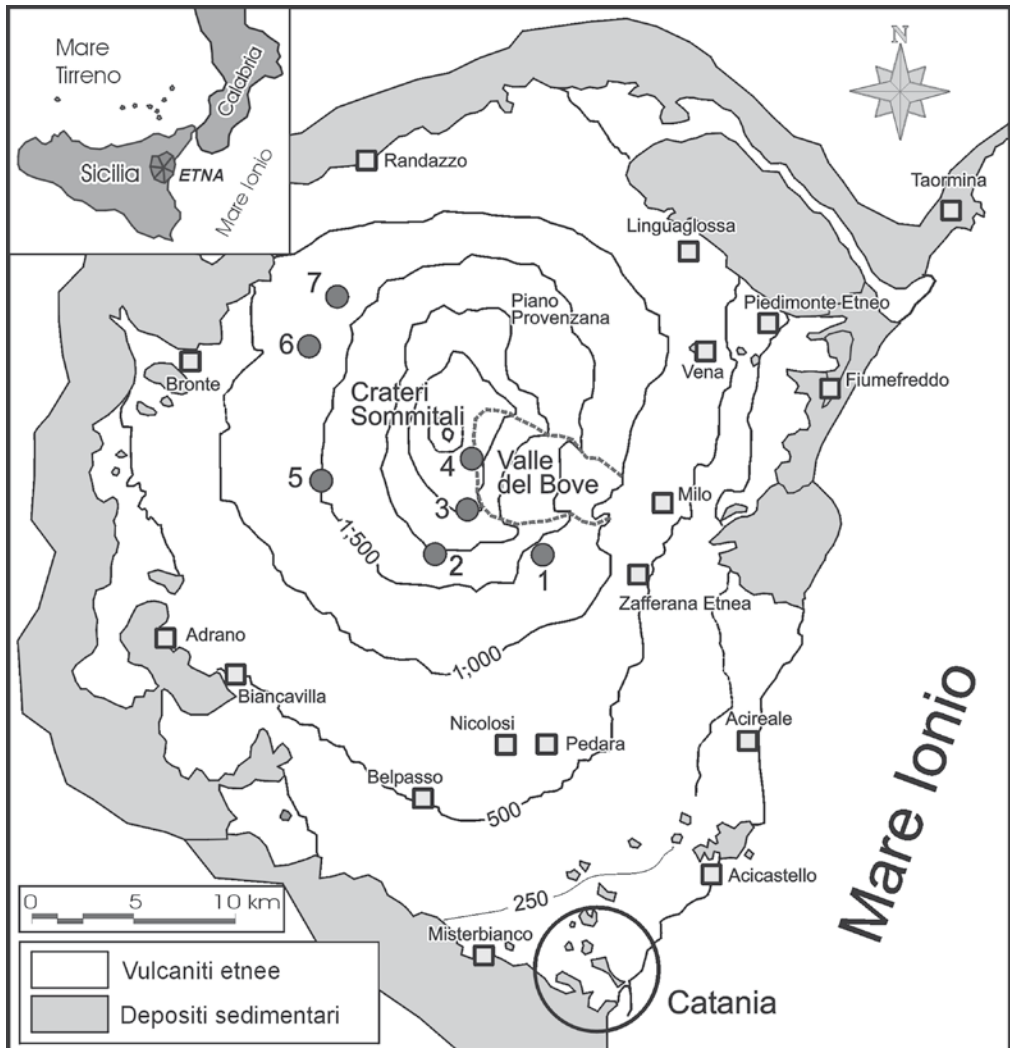


Figura 1 - Area di studio ed ubicazione dei siti riportati in Tabella 1.

gnate da abbondanti colate piroclastiche trasportate ad alcune decine di km dal vulcano. Oltre a queste manifestazioni intense, ma della durata inferiore ai 30 minuti, l'Etna è stato caratterizzato da attività effusiva che ha interessato sia i crateri sommitali che i rifts meridionale, occidentale (Valle del Bove) e nordorientale [Acocella e Neri, 2003]. A seguito delle eruzioni del 2001 e del 2002-2003, si sono formati nuovi centri eruttivi lungo le pendici meridionali e nord orientali da cui sono fuoriusciti volumi significativi di materiale piroclastico [Behncke e Neri, 2003; Andronico et al. 2005], che hanno coperto interamente la parte sommitale del vulcano, conferendole l'aspetto di una vasta ed omogenea superficie scura. Le eruzioni recenti hanno inoltre determinato un considerevole cambiamento nell'aspetto di molte delle colate presenti sull'Etna, in particolare di quelle storiche più vicine ai nuovi centri eruttivi.

Le colate prodotte dall'Etna hanno composizione essenzialmente basaltica (hawaïiti - mu-

geariti; Corsaro e Pompilio, 2004): ciò non comporta una sostanziale variazione del chimismo dei materiali eruttivi, sebbene le modalità eruttive e di messa in posto delle colate associate al processo di raffreddamento, abbiano determinato la formazione di morfologie laviche profondamente diverse. Il tipo di lava più diffuso sull'Etna è quella nota come 'a'a [Chester et al., 1985], termine di origine hawaiana ad indicare lave spigolose, che si differenziano dalle colate di tipo *pahoehoe*, dalla tipica struttura a cordoni.

Pertanto, in relazione alla possibilità di utilizzare le firme spettrali di campo a supporto delle osservazioni satellitari, le superfici di natura vulcanica campionate nell'area di studio (Fig. 1) sono state di due tipi:

- a) superfici recenti costituite da depositi piroclastici, ceneri, lave di tipo 'a'a e frammenti di roccia in posto, situate a quote più elevate;
- b) superfici antiche formate da colate storiche costituite da lave alterate, spesso ricoperte da vegetazione nei primi stadi di colonizzazione (muschi e licheni) e da specie arbustive quale *Genista aetnensis* (ginestra) e, a quote inferiori, da depositi piroclastici.

Le misure in campo

La campagna di misure spettro radiometriche è stata condotta nel mese di giugno 2003, alcuni mesi dopo la fine dell'intensa attività esplosiva del 2002-2003. Questo periodo dell'anno avrebbe garantito una bassa copertura nuvolosa, un'irradianza solare prossima ai valori massimi annuali ed una bassa umidità del suolo. Tutti questi elementi sono importanti per l'acquisizione ottimale delle firme spettrali favorendo un elevato rapporto segnale/rumore. Nel corso della campagna le condizioni atmosferiche sono sempre state ottimali; solo nelle zone in quota, in prossimità delle ultime coperture nevose, si sono verificati fenomeni di evaporazione dal terreno che sono stati tenuti in considerazione sia nella fase di acquisizione che in quella di interpretazione delle firme spettrali.

Per tutti i siti di misura, le caratteristiche dei quali sono riportate in Tabella 1, sono state acquisite le seguenti informazioni:

- a) misure di riflettanza nell'intervallo di lunghezza d'onda 350-2500 nm;
- b) coordinate geografiche, quota, pendenza ed esposizione di ciascun sito di misura;
- c) dati sulle caratteristiche morfologiche e sulla copertura vegetali delle singole unità superficiali;
- d) dati sulle caratteristiche geologiche dei depositi piroclastici recenti e delle colate storiche;
- e) dati sulle modalità di acquisizione delle firme spettrali;
- f) dati meteorologici;
- g) documentazione fotografica.

L'insieme di questi dati è riportato in Figura 2, secondo uno schema definito appositamente per questa campagna. Obiettivo di questo schema è rendere l'acquisizione dei dati di campo il più possibile indipendente dallo stile di lavoro del singolo operatore, al fine di favorirne la gestione all'interno di un archivio comprendente sia i dati spettro radiometrici che i dati ancillari.

La scelta dei siti (Tab. 1) si è basata sulla necessità di campionare sistematicamente i depositi recenti per verificarne la variabilità spettrale a diverse quote ed a diversa distanza dai centri di emissione (zona Belvedere), con particolare riguardo alle variazioni granulometriche. A tal fine è stato seguito un transetto di circa 6 km orientato N-S, avendo cura di registrare i dati nelle stesse condizioni di ripresa.

I dati di riflettanza sono stati acquisiti con uno spettro radiometro Fieldspec di proprietà dell'INGV, che misura la radiazione solare riflessa nell'intervallo di lunghezza d'onda 350-2500 nm [Analytical Spectral Devices, Inc., 2002]. Lo strumento utilizza tre spettrometri

Tabella 1 - Caratteristiche dei siti campionati.

	Località	Quota s.l.m. (m)	Età delle colate	Tipo di superficie
1	Salto del cane	1817	1766	Lave alterate, depositi piroclastici, lapilli e vegetazione erbacea.
	Mt. Zoccolaro	1130	1792	Lave pahoehoe con coperture occasionali di lapilli scoriacei.
	Pian del Vescovo	1430	1792	Vegetazione: licheni, coperture erbacee e arbustiva a dominanza di ginestre
2	Rifugio Sapienza	1910	2002	Lave 'a'a e depositi piroclastici
3	Cono 2001	2550	2001	Lapilli e ceneri
4	Belvedere	2700	2001/2002	Lapilli scoriacei e ceneri. Colate di lava ricche in plagioclasio
		2650	2002/2003	Lave 'a'a
5	Dagala del Diavolo	1750	1610	Lava pahoehoe (Cicirara). Vegetazione: licheni ben sviluppati, coperture erbacee, ginestre e pino laricio
6	Mt. Spagnolo	1450	1536	Lave 'a'a con blocchi fino a 0.2m in diametro. Leggera copertura di ceneri scure del 2002-03. Vegetazione: estesa copertura di licheni e limitata presenza di arbusti e vegetazione erbacea senescente
7	Bottoniera	1350	1981	Lave 'a'a caotiche con blocchi fino a 0.5 m Vegetazione: diffusa presenza di licheni.

cod foglio: ID Code File spettro File Foto (dettaglio)

Mapa di riferimento

Località

Data Coordinate (lat/long)

Ora Quota

Temperatura dell'aria File Foto (generale)

Elevazione sole

Esposizione del versante

Copertura nuvolosa

Intensità del vento

Pendenza

Operatori Codi di misura

Note

Descrizione sito di misura Altezza strumento

Litotipo

Età della roccia Dimensioni pannello

Formazione

Riferimento bibliografico della formazione

Descrizione litologica

Giacitura Inclinazione strati

Grado di alterazione

Descrizione della superficie ID

Figura 2 - Schema adottato per le misure in campo.

che operano rispettivamente negli intervalli 350-1050 nm, 900-1850 nm e 1700-2500 nm; le risoluzioni spettrali sono di 3 nm per il primo spettrometro (intervallo di campionamento 1.4 nm) e di 10-12 nm per i restanti due (intervallo di campionamento di 2 nm). La radiazione riflessa è registrata attraverso un cavo di fibre ottiche.

Il FieldSpec acquisisce direttamente misure di riflettanza come rapporto tra la radiazione solare incidente riflessa dalla superficie e quella riflessa dal pannello di riferimento di Spectralon, assunto come superficie lambertiana. Il FieldSpec può essere utilizzato con lenti diverse, che consentono di modificare l'ampiezza del campo di vista. Nel corso della campagna è stata utilizzata la fibra ottica con FOV di 25° in modo da ottenere firme su superfici di circa 50x50 cm con lo strumento posto a circa 1 m dalla superficie, in posizione nadirale.

Una caratteristica importante dell'operatività di questo spettroradiometro è la possibilità di scegliere il numero di firme spettrali da mediare, prima di acquisire il dato definitivo. Sebbene si possa selezionare fino a 3000 firme, in condizioni di cielo stabile è consigliabile utilizzare un numero massimo di 100 acquisizioni, mentre se le condizioni atmosferiche sono instabili è opportuno scendere anche a 10 misure, in quanto il numero di acquisizioni è direttamente proporzionale ai tempi di registrazione del dato. Questo tipo di opzione permette di acquisire una firma più rappresentativa per ciascuna superficie in quanto attenua il rumore strumentale e tiene in considerazione le piccole variazioni di segnale che possono sfuggire all'operatore. L'errore strumentale relativo per ciascuna firma spettrale è stato stimato al 5%. Un altro importante aspetto nelle modalità di esecuzione della campagna è stato la valutazione dell'eterogeneità delle singole superfici, in particolare delle colate più antiche. Pertanto, per ciascuna unità litologica, sono stati ripresi dati relativi ad ogni elemento considerato rilevante per la stima della riflettanza complessiva, comprendenti sia le diverse colate, che le coperture vegetali.

Risultati

In base agli obiettivi prefissati, i risultati ottenuti sono presentati in modo da evidenziare le variazioni di riflettanza:

- a) dei depositi piroclastici in funzione delle variazioni granulometriche all'aumentare della distanza dai centri eruttivi recenti;
- b) delle diverse colate di lava, nel tentativo di individuarne le firme spettrali rappresentative e la relazione con l'età;
- c) in intervalli discreti, simulando la risoluzione spettrale del satellite ASTER.

Nella fase precedente l'analisi dei risultati tutte le firme spettrali sono state riviste e selezionate in modo da utilizzare solo quelle ritenute effettivamente valide sia in relazione alle modalità di acquisizione, che alla qualità dell'informazione. Ogni curva di riflettanza è calcolata dalla media di cinque firme spettrali, acquisite in base ai criteri precedentemente illustrati. In ognuno dei grafici riportati nelle figure che seguono, alle lunghezze d'onda di 1350-1430 nm e 1750-2000 nm, i dati presentano valori estremamente variabili (*spikes*). Questo comportamento è causato dalla presenza di vapor d'acqua atmosferico che assorbe la radiazione solare incidente. Quindi la diminuzione di quest'ultima determina una diminuzione del rapporto S/N, evidenziato da un maggior disturbo nei valori di riflettanza. Inoltre è evidente come la misura sia più disturbata (basso rapporto S/N) per le firme spettrali acquisite con il terzo spettrometro, poichè la radiazione solare a queste lunghezze d'onda (e quindi il segnale) è minore rispetto al segnale nelle lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso.

Depositi piroclastici

In Figura 3 sono riportate le curve campionate in località Belvedere e le corrispondenti superfici. I valori di riflettanza di queste superfici sono sempre molto bassi: la presenza di

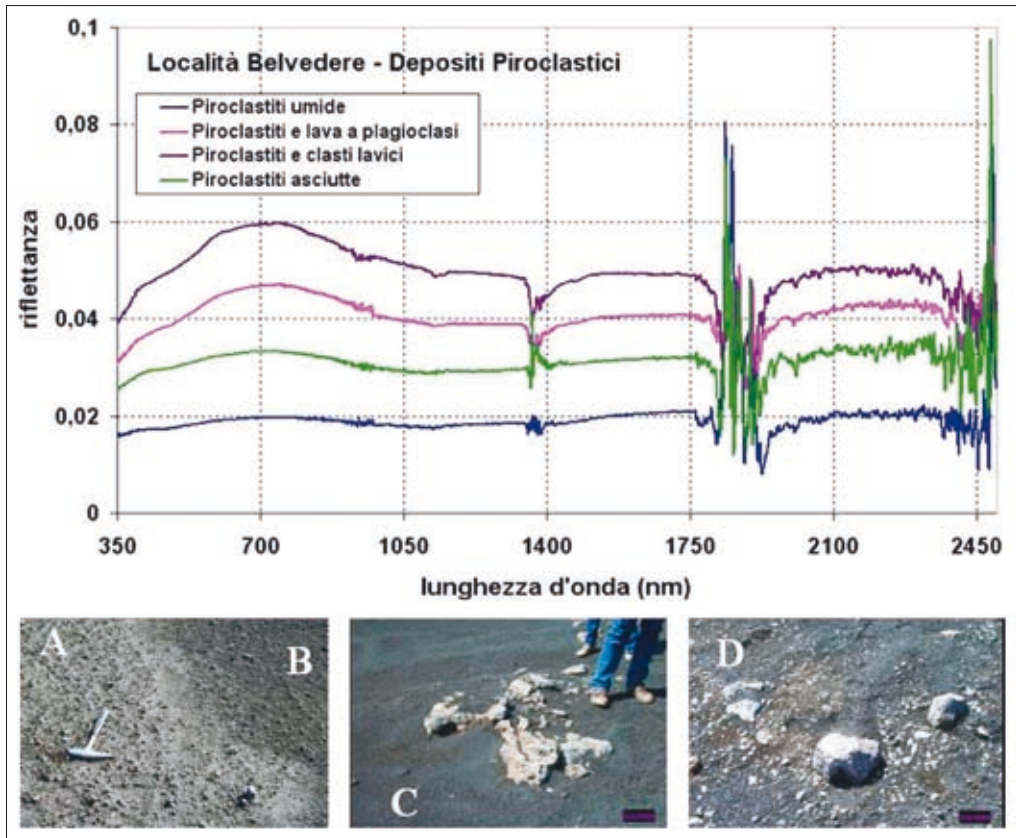


Figura 3 - Firme spettrali campionate a quota 2700 m e comprendenti: piroclastiti asciutte (A), piroclastiti umide (B), piroclastiti e lava in situ (C), piroclastiti e frammenti lavici (D).

acqua (dovuta allo scioglimento delle nevi) nelle piroclastiti (B) determina l'aumento degli effetti di assorbimento della radiazione incidente con conseguente diminuzione della riflettività su tutto l'intervallo di lunghezza d'onda considerato.

Nelle piroclastiti prive di umidità (A) si registra una riflettività di circa 0.01 superiore a quella delle piroclastiti denominate umide (B). La presenza di componenti laviche (clasti e/o roccia in posto) all'interno della porzione di superficie misurata determina un aumento della riflettanza riconoscibile dall'andamento 'a campana' dello spettro nell'intervallo di lunghezze d'onda tra 350 e 900 nm. Tale andamento risulta funzione del rapporto areale tra piroclastiti e componenti laviche. Tanto più sono presenti altri componenti e quindi il target risulta misto (inteso come la porzione di terreno sottesa dall'angolo di vista dello strumento in cui sono presenti diversi materiali) tanto più risulta accentuato tale andamento.

Si precisa che gli spettri relativi ai target misti sono stati acquisiti al fine di verificare il tipo di modifica che avviene al variare di una delle componenti (piroclastiti o lave).

Ad esempio, in Figura 3 (foto D) i frammenti lavici rappresentano circa il 20% dell'area visualizzata. In questa località prevale la copertura dei materiali piroclastici e gli affioramenti di lava sono alquanto rari: pertanto, qualora questa zona fosse analizzata con dati satellitari prevarrebbe decisamente la risposta spettrale relativa ai materiali piroclastici.

Le firme spettrali di depositi piroclastici campionati in località diverse sono riportati in Fi-

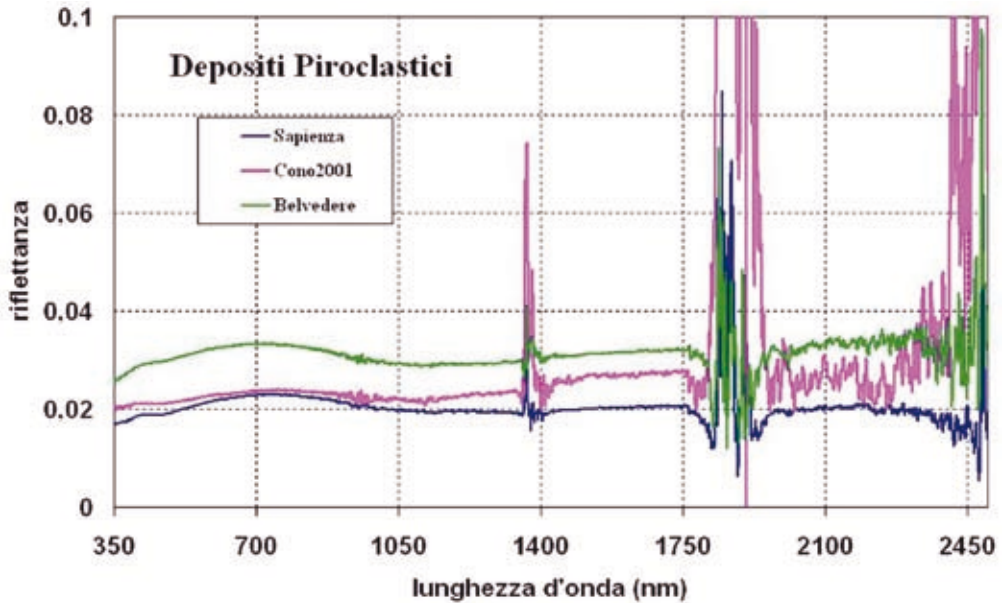


Figura 4 - Firme spettrali di depositi piroclastici a quote diverse.

gura 4. Di questi materiali è stata effettuata l'analisi granulometrica in laboratorio utilizzando i metodi di Wentworth [1922] e Krumbein [1938] i cui risultati sono riportati in Figura 5: la granulometria dei depositi piroclastici diminuisce all'aumentare della distanza dal centro di emissione. La composizione di queste piroclastiti non presenta variazioni sostanziali: in tutti i casi si tratta di scorie basaltiche e ceneri; nella frazione grossolana delle ceneri sono sempre presenti pirosseni ed olivine come fase mineralogica principale [Taddeucci et al., 2002; Andronico et al., 2005]. Le firme spettrali di questi campioni non mostrano sostanziali diversità, con valori di riflettanza sempre compresi tra 0.02 e 0.03. Pertanto, sebbene si riscontri un leggero aumento di riflettanza per le piroclastiti più vicine ai centri eruttivi del 2002-2003 (Belvedere) - con grani di dimensioni maggiori di quelli delle piroclastiti che si sono depositate più lontano (Cono 2001 e Sapienza) - non sono state rilevate variazioni significative di riflettanza in funzione delle variazioni granulometriche.

Colate di lava

La caratterizzazione spettroradiometrica delle colate storiche si è rivelata alquanto complessa per la notevole varietà di coperture che caratterizzano ciascuna di queste unità e per la presenza frequente di materiali piroclastici recenti. La vegetazione inoltre, presente con specie a diverso stadio evolutivo, è l'elemento che rende maggiormente difficoltosa la determinazione della firma spettrale tipica di queste superfici. In Figura 6 sono riportate le firme spettrali delle coperture che caratterizzano la colata del 1792 in prossimità di Monte Zoccolaro.

Le unità campionate sono sempre relative ad aree di circa 50x50 cm e comprendono target "puri" quali *Helichrysum italicum*, vegetazione erbacea senescente e ceneri, e target misti costituiti rispettivamente da scorie, licheni e lave pahoehoe, licheni e ceneri. Quest'ultime, prodotte dall'attività del 2002-2003, hanno i valori di riflettanza più bassi (con variazioni comprese tra 0.02 ed 0.04), coincidenti, nell'intervallo 350-700 nm con quelli del target pahoehoe con licheni e ceneri; entrambe queste superfici hanno riflettanza che non supera 0.06. La presenza di licheni quale, ad esempio, *Stereocaulon vesuvianum* (curva scorie e licheni) fa

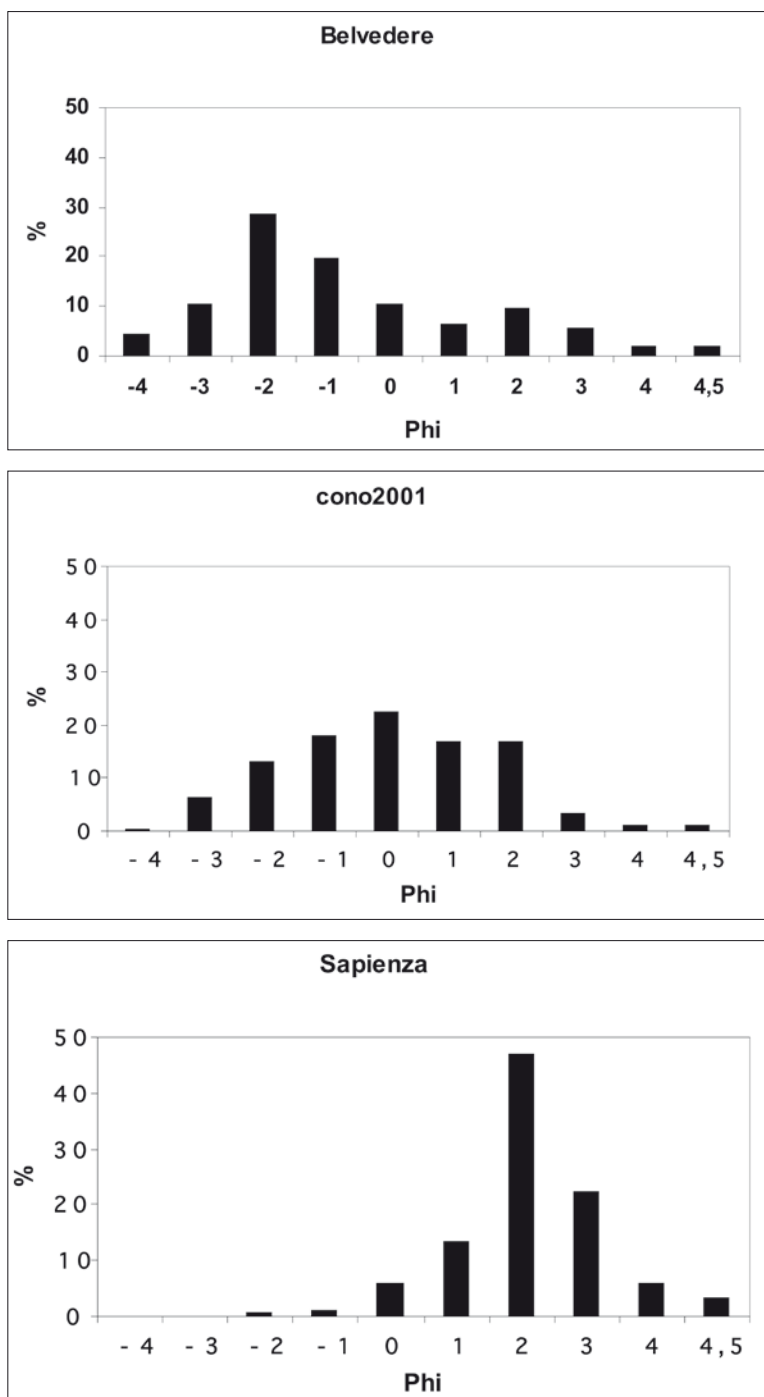


Figura 5 - Dimensioni dei grani dei depositi piroclastici campionati a Belvedere, Cono 2001 e Sapienza.

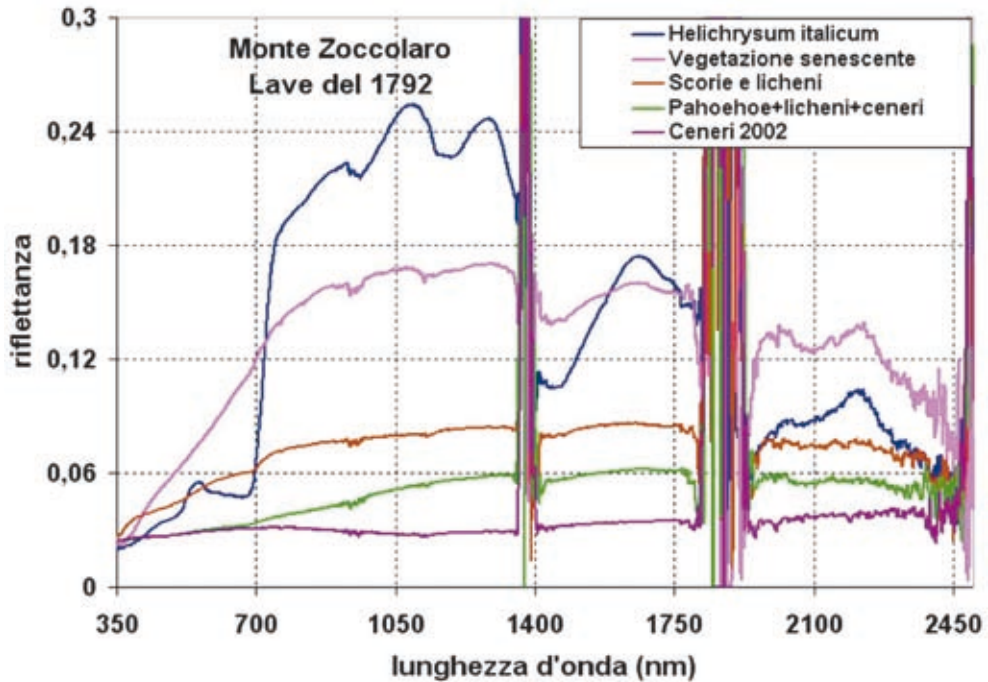


Figura 6 - Firme spettrali delle superfici campionate a Monte Zoccolaro.

innalzare la riflettanza dei materiali piroclastici fino a valori di circa 0.08 a lunghezze d'onda maggiori di 700 nm. Le curve spettrali relative ad *Helichrysum italicum* e vegetazione senescente mostrano andamenti e valori di riflettanza tipici per questo tipo di superfici.

Nel caso di molte unità vulcaniche, al pari di quanto accade a Monte Zoccolaro, ad esempio, la caratterizzazione spettrale dipende dal peso che viene dato a ciascuna firma spettrale nel calcolo del valore medio di riflettanza. Se questo calcolo non è effettuato dopo un'attenta valutazione della copertura areale dei singoli elementi superficiali, i risultati che si ottengono possono essere considerevolmente diversi e quindi poco attendibili.

Pertanto, in considerazione delle incertezze che possono essere determinate dalla approssimativa valutazione del contributo della componente vegetale nel calcolo della riflettanza, il confronto tra firme spettrali di colate di età diversa è stato effettuato tenendo in considerazione solo la componente rocciosa (Fig. 7).

In Figura 7 le firme spettrali tendono a formare due raggruppamenti: il primo include i dati campionati nelle località Rifugio Sapienza e Salto del Cane che danno origine a curve con valori che oscillano intorno a 0.02 su tutto l'intervallo considerato; in entrambi i siti sono presenti depositi piroclastici che, nel caso di Salto del Cane si sono sovrapposti alle lave del 1766. Il secondo raggruppamento comprende le firme campionate nelle località Monte Zoccolaro e Diagala del Diavolo (prevalenti lave pahoehe) e Bottoniera (lave 'a' a con diffusa presenza di licheni). Queste curve presentano una maggiore pendenza nell'intervallo 350-700 nm e a lunghezze d'onda superiori ai 700 nm, sono comprese tra valori di 0.04 e di 0.07. La variazione in riflettanza misurata in campagna è quindi di 0.03 per le superfici, quali lave pahoehe e lave 'a' a con presenza di licheni.

Infine, i dati di campo riportati in Figura 7 sono stati ricampionati alla risoluzione spettrale delle prime 9 bande del sensore ASTER operativo a bordo del satellite TERRA (Tab. 2), in

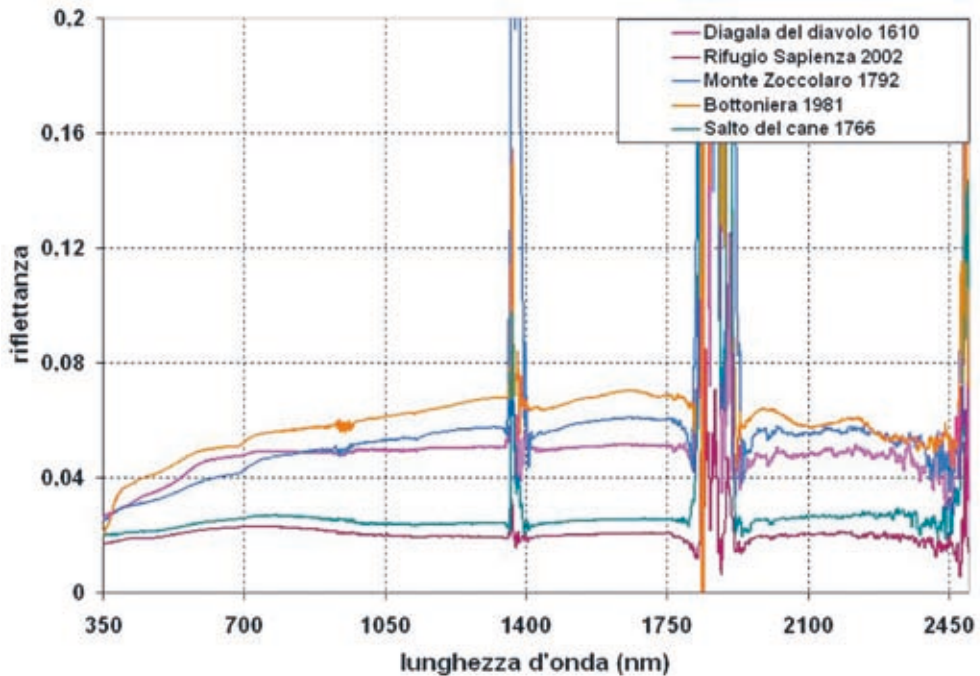


Figura 7 - Riflettanze di colate di età diversa.

modo da simulare la possibilità di distinguere le diverse superfici se osservate da remoto (Fig. 8). Tra le bande spettrali di ASTER quella in cui si riscontra il miglior contrasto spettrale tra le superfici del 1981, 1766 e 1610 è la 4 (1600-1700 nm), sebbene complessivamente non si osservi alcun elemento che permetta di correlare la risposta spettrale con l'età delle colate. Va tuttavia notato come i valori di riflettanza nelle bande del SWIR delle lave di tipo pahoehoe abbiano un andamento molto simile alle curve delle piroclastiti, sebbene con valori marcatamente superiori.

Conclusioni

Il lavoro effettuato rappresenta il primo tentativo di caratterizzare spettralmente, mediante misure di riflettanza nell'intervallo di lunghezze d'onda compreso tra 350 e 2500 nm, i depositi piroclastici recenti e le colate di lava storiche dell'Etna. In questa prima ricognizione sono stati scelti siti che presentassero superfici significative della storia dell'attività vulca-

Tabella 2 - Intervalli spettrali dei primi 9 canali del satellite ASTER [<http://asterweb.jpl.nasa.gov/>].

VNIR	SWIR
Band 1: 520 - 600 nm	Band 4: 1600 - 1700 nm
Band 2: 630 - 690 nm	Band 5: 2145 - 2185 nm
Band 3: 760 - 860 nm	Band 6: 2185 - 2225 nm
	Band 7: 2235 - 2285 nm
	Band 8: 2295 - 2365 nm
	Band 9: 2360 - 2430 nm

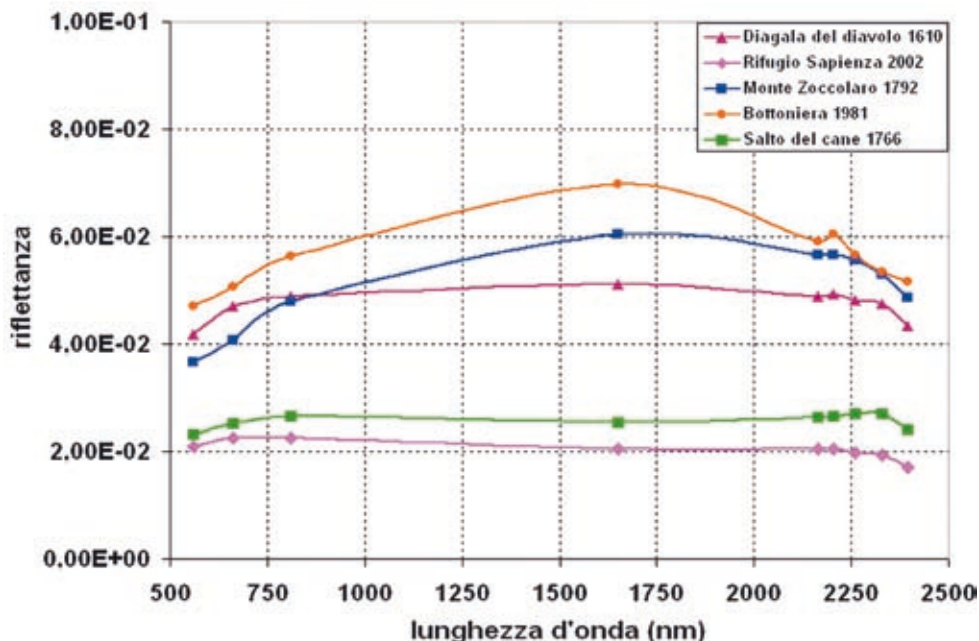


Figura 8 - Valori di riflettanza al terreno ricampionati alla lunghezza d'onda delle bande spettrali di ASTER.

nica del Monte Etna. I depositi piroclastici recenti (tephra, scorie, lapilli, ceneri) presentano ovunque firme spettrali quasi identiche, con valori di riflettanza inferiori a 0.04, come prevedibile per materiali vulcanici poco riflettenti. Anche le variazioni granulometriche di quest'ultimi determinano piccole variazioni nella risposta spettrale dei depositi piroclastici, mentre maggiore è la variazione dovuta alla contaminazione da clasti lavici o da licheni ed erba secca. Le firme di queste superfici si distinguono da quelle relative alle lave di tipo pahoehoe che assumono comunque valori di riflettanza inferiori a 0.07. Tuttavia lo studio della relazione tra firme spettrali ed età delle diverse colate è reso complesso dalla eterogeneità di queste superfici. E' possibile migliorare la determinazione della copertura areale di ciascuna componente delle singole colate, sebbene ciò richieda un attento lavoro in campo o di analisi di immagini telerilevate.

Inoltre, l'estrema regolarità della risposta spettrale dei depositi piroclastici riveste un'importanza particolare per lo studio dei *plumes* vulcanici, in quanto fornisce un dato di riferimento costante su vaste aree delle pendici etnee. Dal punto di vista satellitare sono proprio i bassi valori di riflettanza dei depositi recenti negli intervalli del visibile e dell'infrarosso che permettono la misura di costituenti del plume. Infatti, la presenza di un deposito recente sottostante un plume di degassamento influenza meno il segnale registrato dal sensore rispetto al particolato vulcanico presente nel plume stesso.

Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato con il contributo del Gruppo Nazionale di Vulcanologia (GNV). Si ringrazia il Gruppo di Soccorso Alpino della Guardia di Finanza di Nicolosi per il supporto logistico e Lucia Gurioli per le analisi granulometriche dei depositi piroclastici. Si desiderano inoltre ringraziare i valutatori ed in particolare il Prof. Enzo Pranzini per aver rivisto criticamente il lavoro.

Bibliografia

- Acocella V., Neri M. (2003) - *What makes flank eruptions? The 2001 Etna eruption and its possible triggering mechanisms*. Bulletin of Volcanology, 65: 517-529.
- Analytical Spectral Devices, Inc. (2002) - *FieldSpec Pro User's Guide*. 03/13/2002.
- Andronico D., Branca S., Calvari S., Burton M., Caltabiano T., Corsaro R.A., Del Carlo P., Garfi G., Lodato L., Miraglia L., Muré F., Neri M., Pecora E., Pompilio M., Salerno G., Spampinato L. (2005) - *A multi-disciplinary study of the 2002-03 Etna eruption: insights into a complex plumbing system*. Bulletin of Volcanology, 67: 314-330.
- Barry P.S., Jarecke P., Pearlman J., Jupp D.L.B., Lovell J., Campbell S. (2002) - *Radiometric Calibration Validation of the Hyperion Instrument using Ground Truth at a Site in Lake Frome*. Proc. SPIE, 4480: 242-246.
- Behncke B., Neri M. (2003) - *Cycles and trends in the recent eruptive behaviour of Mt. Etna (Italy)*. Canadian Journal of Earth Sciences, 40: 1405-1411.
- Branca S., Del Carlo P. (2004) - *Eruptions of Mt. Etna during the past 3200 years: A revised compilation integrating the historical and stratigraphic records*. In: Bonaccorso A., Calvari S., Coltelli M., Del Negro C., Falsaperla S. (eds.), Mt. Etna: Volcano Laboratory, Geophysical Monograph Series, 143: 1-27.
- Bogliolo M.P., Teggi S., Buongiorno M.F., Pugnaghi S., Corradini S. (2004) - *Inspecting MIVIS capability to retrieve chemical-mineralogical information: evaluation and analysis of VNIR-SWIR data acquired on a volcanic area*. Int. J. Remote Sensing, 18: 3769-3797.
- Carmichael R.S. (1982) - *Handbook of Physical Properties of Rocks*. Vol. I. CRC Press, Inc., Boca Roton, Florida, pp. 385.
- Chester D.K., Duncan A.M., Guest J.E., Kilburn C.R.J. (1985) - *Mount Etna: The anatomy of a volcano*. Chapman and Hall London, pp. 404.
- Clark R.N., Roush T.L. (1984) - *Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications*. J. Geophys. Res., 89: 6329-6340.
- Corsaro R.A., Pompilio M. (2004) - *Dynamics of magmas at Mount Etna*. In: Bonaccorso A., Calvari S., Coltelli M., Del Negro C., Falsaperla S. (eds.), Mt. Etna: Volcano Laboratory. Geophysical Monograph Series, 143: 91-110.
- Hapke B. (1993) - *Introduction to the Theory of reflectance and Emittance Spectroscopy*. Cambridge University Press, New York, 455 pp.
- Goetz A.F.H. (1992) - *Imaging Spectrometry for Earth Observations*. Episodes, 15: 7-14.
- Krumbein W.C. (1938) - *Size frequency distribution of sediments and the normal phi curve*. J. Sediment. Petrol., 8: 84-90.
- Mazzarini F., Pareschi M.T., Sbrana A., Favalli M., Fulignati P. (2001) - *Surface hydrothermal alteration mapping at Vulcano island using MIVIS data*. Int. J. Remote Sensing, 22(11): 2045-2070.
- Spinetti C., Buongiorno M.F., Lombardo V., Merucci L. (2003) - *Aerosol optical thickness of Mt. Etna volcanic plume retrieved by means of the Airborne Multispectral Imaging Spectrometer MIVIS*. Annals of Geophysics, 46 (2).
- Taddeucci J., Pompilio M., Scarlato P. (2002) - *Monitoring the explosive activity of the July-August 2001 eruption of Mt. Etna (Italy) by ash characterization*. Geoph. Res. Lett., 29, doi:10.1029/2001GL014372
- Wentworth C.K. (1922) - *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. J. Geol. 30: 377-392.

Manoscritto ricevuto il 10/07/2005, accettato il 20/04/2006.